

2 Conceitos Gerais e Revisão Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica realizada permitiu estabelecer que um número extremamente reduzido de trabalhos sobre perfuração por descamação térmica foi desenvolvido até o momento, todos estes frutos de uma colaboração entre o **Massachusetts Institute of Technology** e o **Los Alamos National Laboratory**. Segundo os estudos experimentais e numéricos desenvolvidos, fica claro que a modelagem do processo de perfuração por descamação térmica envolve diversos mecanismos aerodinâmicos, termodinâmicos e relativos ao comportamento de rochas que são, isoladamente, fenômenos abertos. A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica de algumas técnicas de perfuração, e da fenomenologia envolvida no processo de descamação térmica em rochas.

2.1. O Futuro da Energia Geotérmica

A energia geotérmica envolve um espectro de problemas fundamentais e aplicados que se encontram em diferentes fases de desenvolvimento, tanto na engenharia quanto na economia. O aproveitamento deste tipo de fonte de energia depende da disponibilidade de recursos naturais, tais como vapor ou água quente (*aquíferos*) ou pedras quentes. O desenvolvimento da exploração destes recursos depende da disponibilidade natural e do custo de extração. A perfuração por jatos quentes é uma técnica que tem sido cogitada para a exploração destes recursos. Seu interesse, quando comparando às técnicas convencionais, reside na variação linear dos custos de perfuração com a profundidade.

Na Figura 2.1 se mostra um esquema do processo de aproveitamento da energia geotérmica, no qual um reservatório geotérmico é alimentado constantemente pelo afloramento de água, qual é aquecida pelo contato com uma fonte de calor, a rocha quente. Este contato pode levar a emissão de vapor.

Quando um furo geotérmico ou uma fissura natural, que pode ser idealizada na forma de um tubo longo com paredes isoladas, penetra no reservatório geotérmico, é possível conduzir o vapor gerado até a superfície e para aproveitá-lo, o que geralmente ocorre em usinas geotérmicas.

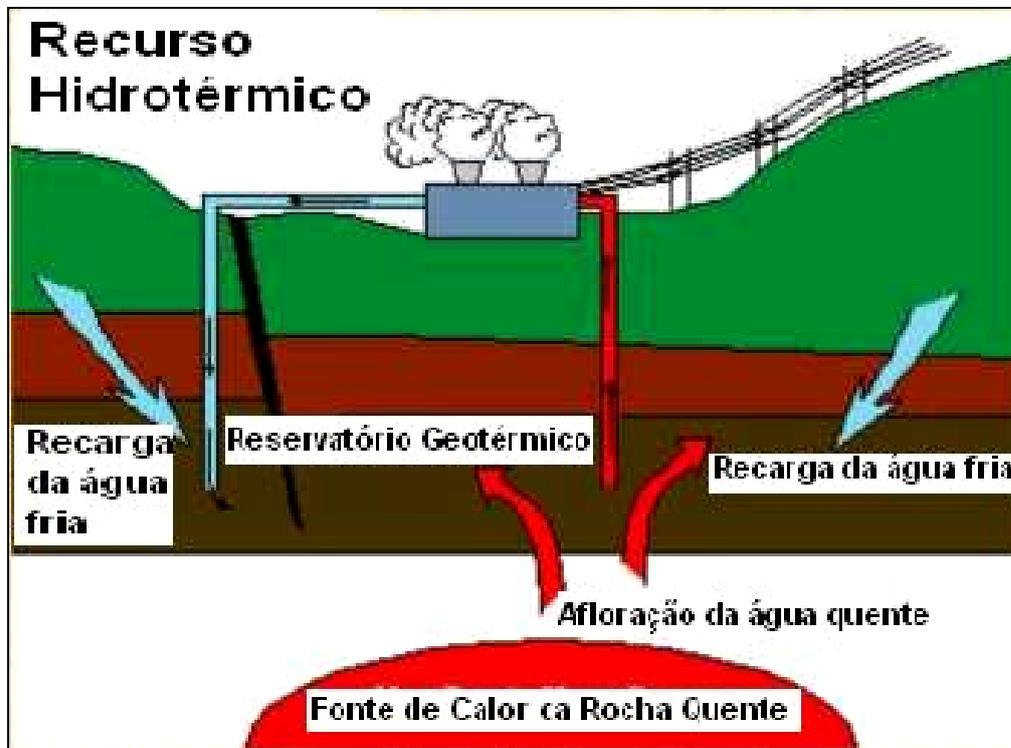


Figura 2.1: Esquema do aproveitamento da energia geotérmica (Tester *et al.*, 1994)

Estudos feitos por Tester *et al.* (1994), demonstram que a produção geotérmica convencional é baseada na existência de rochas permeáveis nas quais existem fontes de água que podem ser extraídas. O sucesso da perfuração depende de alguns fatores tais como: a temperatura e a pressão do jato, a transferência de calor, a entalpia do fluido circulante, e a composição química do escoamento. A fim de criar condições de aproveitamento da energia no interior da terra, estes autores propuseram a utilização da técnica de perfuração por descamação térmica. O equipamento proposto é construído por uma cabeça de broca em liga de tungstênio, em forma de um projétil ou cone, que funciona como maçarico. Este é alimentado pelos produtos de combustão de uma chama procedente de um processo de combustão da mistura de hidrogênio/oxigênio sob pressão, o qual é caracterizado por temperaturas de até três mil graus centígrados (3000°C), temperatura capaz de produzir uma descamação em qualquer tipo de rocha.

Foram perfurados na crosta terrestre dois poços de 360 m de profundidade, e distantes entre si de 350 m. O diâmetro aproximado do poço é um metro. Essa profundidade foi escolhida de modo que uma camada de rocha quente seja alcançada. Em um dos poços, é injetada água sob pressão que, ao entrar em contato com a rocha, é aquecida e expelida pelo outro poço. Neste segundo poço o vapor dá água é recebido em caldeiras ou captadores de vapor, os quais estão conectados a uma usina geotérmica.

A exploração da energia geotérmica por esta técnica de perfuração apresenta as seguintes vantagens (Tester *et al.*, 1994):

- ❖ Não há contaminação ambiental. É uma tecnologia inteiramente limpa,
- ❖ O furo não precisa de revestimento, pois a própria rocha reveste o poço de forma definitiva com uma perfeita vedação, dispensando qualquer tipo de manutenção futura,
- ❖ Grande velocidade de perfuração atingindo duzentos metros por dia,
- ❖ Menor custo do que a perfuração convencional.

2.2.

Técnicas de Perfuração Convencionais

Dentre as técnicas usualmente mais empregadas, encontram-se a perfuração convencional por brocas rotativas, a perfuração por pulsos percussivos e a perfuração por jatos hidráulicos (Williams *et al.*, 1988).

Na perfuração rotativa, as rochas são escavadas pela ação simultânea da rotação e do peso aplicados a uma broca situada na extremidade inferior de uma coluna de perfuração. Este sistema de perfuração trabalha bem em paredes de rochas macias, como, por exemplo, as rochas sedimentárias encontradas ao perfurar poços de óleo e gás, Bourgoyne *et al* (1991). Nestas rochas macias, as taxas de penetração típicas são da ordem de 30 m/h. Entretanto, dificuldades ocorrem quando da utilização desta técnica convencional em rochas duras, tais como granitos e quartzos, onde as taxas de penetração caem para a faixa de 1 –

7 m/h. Usualmente, as brocas de perfuração rotativa são classificadas em dois tipos, as rotativas sem partes móveis e as rotativas com partes móveis.

As brocas sem partes móveis são aquelas que têm elementos cortantes fixos ao corpo da broca. Estas têm como características operacionais utilizar a potência hidráulica da sonda de perfuração para obter altas velocidades do escoamento através da face da broca para resfriar os cortadores e remover os cascalhos do fundo do furo. Esse resfriamento constante evita o desgaste dos cortadores, possibilitando que a broca esteja sempre em contato com a superfície da rocha durante o processo de perfuração. Entre os fatores que afetam o desgaste da broca encontram-se o peso sobre a broca, as vibrações, e a rotação. Enquadram-se em esta classificação as brocas de lâmina, as brocas de diamante natural, as brocas impregnadas e brocas PDC (Diamante Policristalino Compactado). Na Figura 2.2 mostra-se uma broca de PDC com incrustações de diamante sintético a qual é usada preferencialmente para perfurar formações homogêneas, e apresenta alta taxa de penetração. A Figura 2.3 mostra as brocas de diamante natural, as quais são usadas em formações duras e abrasivas, seu mecanismo de ação é a perfuração por esmerilhamento.

BROCA DE PDC (DIAMANTE SINTÉTICO)

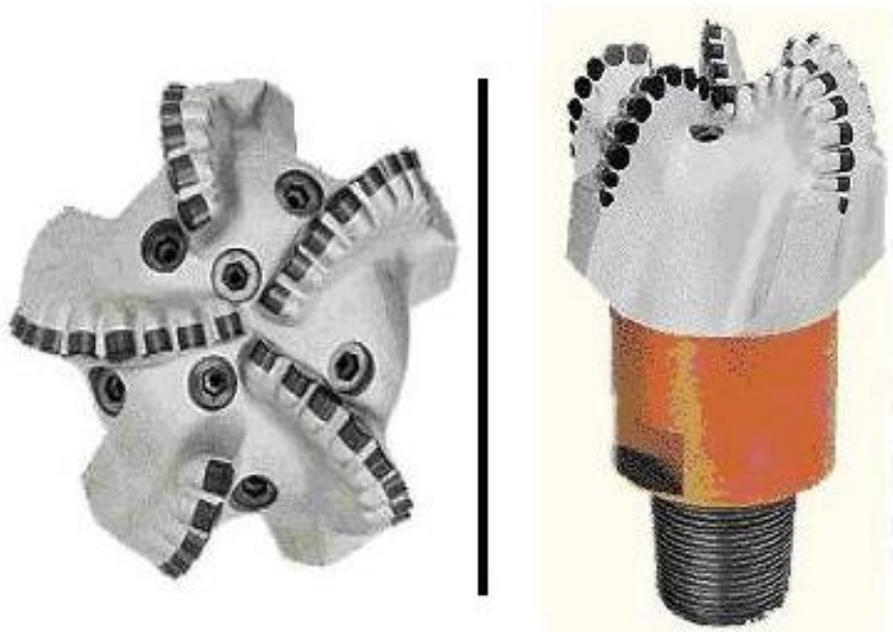


Figura 2.2: Broca de Perfuração Rotativa sem partes móveis “Broca de PCD (Diamante Policristalino Compactado)” (Bourgoyne *et al*, 1991).

BROCA DE DIAMANTE NATURAL

Figura 2.3: Broca de Perfuração Rotativa sem partes móveis “Broca de Diamante Natural” (Bourgoyne *et al*, 1991).

As brocas com partes móveis são aquelas que possuem vários cones (de um a quatro) sobre os quais se encontram fixados os elementos cortantes. Este tipo de broca normalmente apresenta um *offset* entre os cones, que é a medida de quanto os eixos dos cones encontram-se deslocados em relação ao eixo principal de rotação da coluna, de tal forma que estes eixos não se interceptem em um ponto comum. A representação de uma broca com *offset* é mostrada na Figura 2.4. Este deslocamento faz com que, periodicamente, cada cone pare de girar, enquanto a broca permanece em rotação, para então arrancar um pedaço da formação, comportando-se como uma broca sem partes móveis. Na Figura 2.5 mostram-se brocas tricônicas utilizadas em formações suaves, de dureza média, abrasivas de dureza média, e em formações duras muito abrasivas.

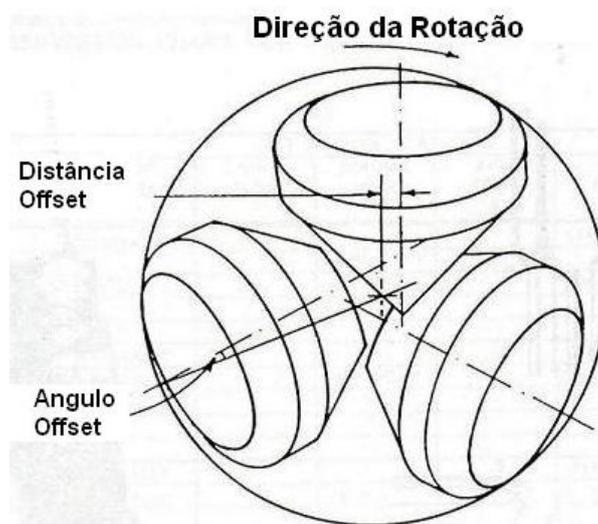


Figura 2.4: Esquema de um *offset* das brocas tricônica (Bourgoyne *et al*, 1991).

Brocas Tricônicas: Estrutura Cortante



Figura 2.5: Broca de Perfuração Rotativa com partes móveis “Broca Tricônica” (Site www.geocities.com.br).

De modo geral, as brocas rotativas com partes móveis “brocas de cones” são mais baratas e mais flexíveis que as brocas sem partes móveis. No entanto, devido a existência de rolamentos, sua durabilidade é menor, o que implica que seu tempo de utilização é menor do que o das brocas sem partes móveis. A escolha da melhor combinação de brocas é também função das taxas de penetração obtidas, devendo-se igualmente levar em conta que as formações rochosas possuem intercalações. Deve-se evitar, tanto quanto possível, manobras para a troca da broca. Nas situações de perfuração em grandes profundidades, as brocas sem partes móveis vêm sendo utilizadas com vantagem.

O método de perfuração por percussão utiliza uma broca tipo formão para pulverizar a rocha. Em geral este tipo de perfuração trabalha com martelos movidos por um motor ou por ar comprimido, e com pequenas rotações da broca para apresentar uma nova superfície a ser perfurada. A circulação do fluido de perfuração se encarrega de limpar o fundo do poço e carregar os cascalhos até a superfície a fim de não prejudicar o avanço da broca. A Figura 2.6 mostra o esquema de uma broca tipo martelo, as quais são propícias para formações

duras e frágeis, além de serem utilizadas em grandes profundidades e grandes diâmetros de poços.



Figura 2.6: Broca por Pulsos Percussivos “Broca Martelo” (Bourgoyne *et al*, 1991).

As técnicas mencionadas acima requerem o auxílio de substâncias tais como óleos especiais (bentonita e a baritina) que são empregados devido a sua elevada eficiência como inibidor do desgaste das brocas. Entretanto, um dos grandes problemas dos fluidos a base de óleo é seu descarte no meio ambiente, pois seus compostos, ricos em diesel e outros óleos minerais, tendem a persistir por muitos anos nos meios marinhos. A bentonita, antes de sua utilização, deve ser previamente tratada quimicamente e hidratada para reduzir o seu potencial de contaminação.

Dentre as técnicas ainda na fase de desenvolvimento encontram-se a perfuração por plasma, por laser e a perfuração por jato quente. A complexidade do projeto da unidade de perfuração, a qual influencia diretamente o custo de perfuração, ou a viabilidade de perfurar certos tipos de materiais, podem tornar o processo ineficiente em regiões de grande diversidade rochosa. Estes são obstáculos a serem vencidos na implementação da perfuração por jato quente.

Além disto, o custo da perfuração está relacionado diretamente com o tempo que se emprega no processo. A troca das brocas por desgaste ou mesmo pequenas taxas de perfuração (de 0,1 a 1,0 m/h), ambos relacionados à dureza do material da rocha, são os principais fatores que contribuem para o acréscimo de tempo e custo nas perfurações convencionais (Rauenzahn, 1986). Pesquisas recentes buscam obter maiores taxas de penetração em rochas mais resistentes e desenvolver dispositivos de perfuração com menor desgaste e manutenção, permitindo assim o alcance de maiores profundidades sem necessidade de repetidas trocas do dispositivo perfurador.

2.3.

Perfuração de Rochas por Jatos Quentes

Neste trabalho é abordada a técnica de perfuração por um jato supersônico quente, o qual é dirigido contra a superfície da rocha, retirando assim a camada superficial da rocha, a qual é continuamente estilhaçada. Rochas com difusividade térmica baixa tendem a acumular quantidades mais elevadas de energia, proporcionando assim a concentração de altas tensões térmicas no seu interior. Dependendo das características mecânicas dos materiais dessa rocha e do acúmulo de tensões térmicas geradas pelo jato quente, pequenas falhas internas podem se propagar em trincas, desencadeando então o processo de descamação da rocha em pequenos estilhaços.

Devido à natureza desse processo de descamação, esta técnica de perfuração tem maior eficiência em rochas duras, tais como granito ou quartzo, levando assim a taxas de penetração mais elevadas, quando comparadas com aquelas obtidas com as técnicas convencionais. A fonte de energia empregada para o aquecimento da rocha pode ser de origem luminosa (comumente um feixe de laser) ou térmica (combustão). No primeiro caso, o acúmulo dos estilhaços gerados na descamação tende a obstruir a superfície da rocha, prejudicando assim a continuidade do processo. No segundo caso, jatos de gases supersônicos quentes, gerados por combustão, parecem ser mais adequados para garantir a continuidade do processo de descamação por proporcionar,

simultaneamente, alto fluxo de calor e a remoção dos estilhaços gerados para longe do local de perfuração.

Rauenzahn (1986) mostra que fluxos de calor da ordem de 1,0 a 10 MW/m^2 são necessários para o desencadeamento do processo de perfuração. Tais fluxos de calor foram obtidos com a queima da mistura de propano ou gás natural, com oxigênio ou com ar, cujas temperaturas de combustão adiabática se encontram na faixa de 2500 a 3000 K. A Figura 2.7 mostra como o jato supersônico, oriundo do processo de combustão, impacta sobre a rocha a ser perfurada.

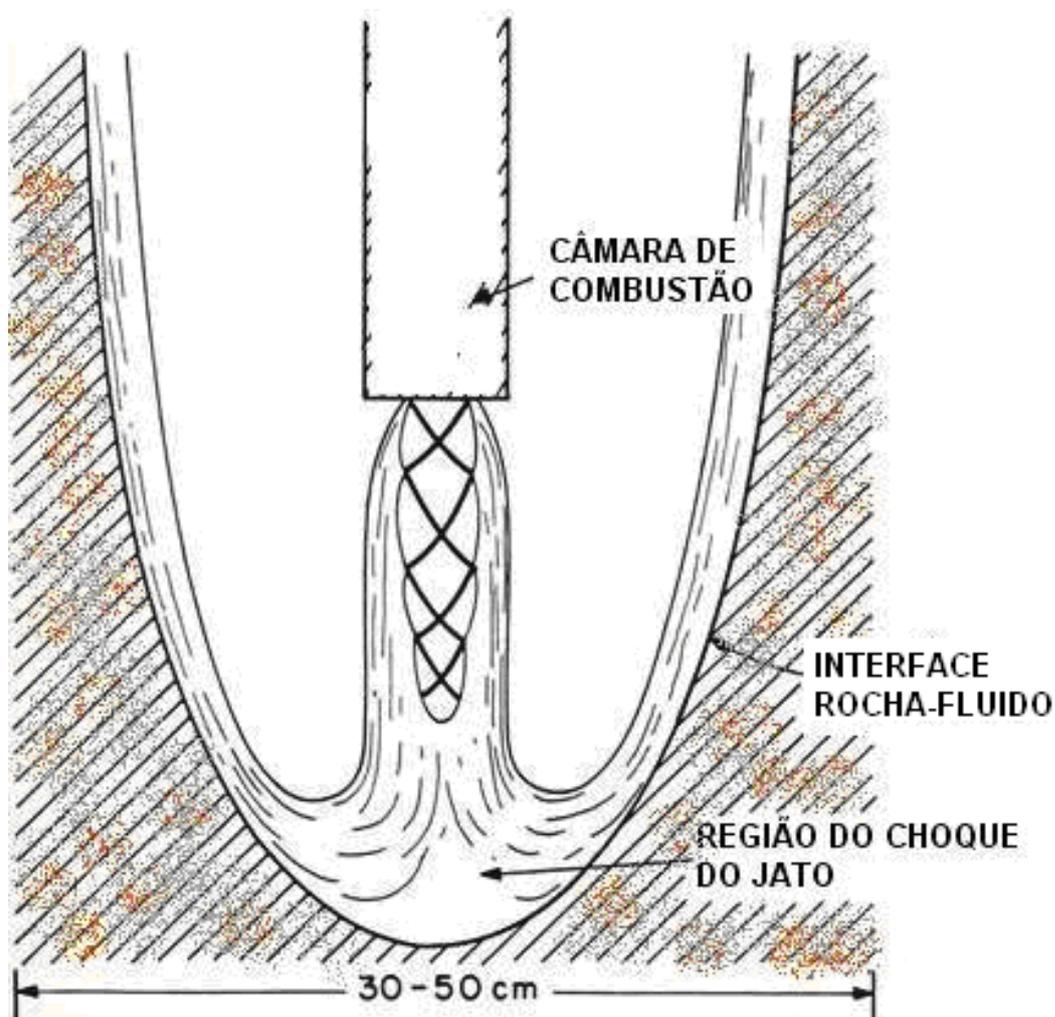


Figura 2.7: Perfuração de rocha por um jato quente (Rauenzahn, 1991).

2.4.

Estudos Experimentais do Processo de Descamação Térmica

Os diversos estudos realizados do processo de descamação térmica de rochas abordaram diferentes aspectos necessários ao desenvolvimento desta técnica de perfuração englobando, em particular, o mecanismo de fratura da rocha e o processo de transferência de calor.

Rauenzahn (1989), Rauenzahn e Tester (1991), Wilkinson e Tester (1993a, 1993b) apresentam estudos do processo de descamação térmica empregando um jato. O método experimental desenvolvido por Rauenzahn (1989) envolve ensaios utilizando vários termopares distribuídos no interior da rocha. A partir da localização de cada termopar, do tempo de cada ensaio e da evolução da temperatura em cada um destes pontos, foi proposto um modelo de distribuição de temperatura, o qual permite inferir temperatura da superfície exposta da rocha (T_s). Porém, o tempo de resposta dos termopares, e sua deterioração, pela exposição direta ao jato quente com o avanço do dispositivo perfurador para o interior da rocha, não permitem muita acurácia nessas medidas. Além disso, fatores como perda de calor nas paredes, variações na vazão de propelentes e imperfeições no material da rocha contribuem para a dificuldade de se estimar adequadamente o fluxo de calor transferido do gás para rocha. Este autor também realizou simulações do processo de descamação em rochas para prever o fluxo de calor na superfície da rocha durante o processo de descamação.

Wilkinson e Tester (1993b) desenvolveram melhoras significativas destas técnicas experimentais. Utilizando um pirômetro infravermelho previamente calibrado, foi efetuada a medição da temperatura, a qual necessita conhecimento da emissividade da superfície da rocha no momento da descamação térmica. Um feixe de laser potente, com fluxo de calor previamente medido, foi usado para a calibração das imagens obtidas com o pirômetro infravermelho. Assim, uma vez aplicado o fluxo de calor por um jato supersônico, o campo de temperatura na superfície pôde ser obtido com maior acurácia.

Ambos trabalhos determinaram que a quantidade de calor transferida para a rocha está relacionada a distância adimensionalizada da saída do jato até a

superfície da rocha SOD (*Stand-off Distance*), proposta por Rauenzahn (1986) e foi definida como:

$$SOD = \frac{Z_{dr}}{R_{noz}}, \quad (2.1)$$

onde Z_{dr} é a distância entre a saída do bocal do jato e a superfície exposta da rocha e R_{noz} é o raio da saída do bocal do jato.

Os resultados experimentais obtidos por estes autores são reportados em termos adimensionais, utilizando-se, para este fim, o número de Stanton como a referência para as relações entre quantidades de calor envolvidas no processo:

$$St = \frac{\dot{Q}_r}{\dot{Q}_{jet}}, \quad (2.2)$$

onde \dot{Q}_r é o fluxo de calor transferido para a rocha, e \dot{Q}_{jet} é o fluxo de calor fornecido pelo jato supersônico quente.

De acordo com o balanço energético, o qual é estabelecido considerando-se um volume de controle ao redor da interface entre o gás do jato quente e a rocha, o fluxo de calor transferido para a rocha é:

$$\dot{Q}_r = (\rho C_p)_r U_r (T_s - T_{ro}), \quad (2.3)$$

onde ρ_r é a densidade da rocha, C_{p_r} é o calor específico da rocha, U_r a velocidade de perfuração, T_s a temperatura na superfície da rocha no momento da descamação e T_{ro} a temperatura inicial da rocha no estado de equilíbrio. O fluxo de calor disponibilizado pelo jato quente para a rocha é:

$$\dot{Q}_{jet} = (\rho C_p)_{jet} U_{jet} (T_{jet} - T_s), \quad (2.4)$$

onde ρ_{jet} é a densidade dos gases de escape do jato, $C_{p_{jet}}$ o calor específico à pressão constante dos gases na saída do jato, U_{jet} a velocidade do jato no

plano de saída do bocal, T_{jet} a temperatura do jato no plano de saída do bocal, e T_s a temperatura na superfície da rocha no momento de descamação.

Diversos mecanismos de descamação de rochas duras por aplicação superficial de altos fluxos de calor foram descritos por Rauenzahn (1986), os quais são baseados no conhecimento das características termomecânicas das rochas e dos modos de fratura.

Além desta análise termomecânica, estudos da perfuração de rochas por jato supersônico quente, e importantes melhorias nos dispositivos experimentais foram realizados por Calaman e Rolseth (1961), citados por Rauenzahn (1986), permitindo avanços consideráveis neste método de perfuração.

Estudos exclusivamente para perfuração de rochas por jato supersônico quente foram realizados com sucesso por Browning (1981) e Williams (1985) citados por Rauenzahn (1986). Estudos de campo deste processo também foram realizados a maiores escalas no **Los Alamos National Laboratory** por Williams et al. (1988), onde foram analisados os principais mecanismos do processo de perfuração por jato quente. Estudos experimentais citados por Rauenzahn (1986) demonstraram que o processo de perfuração por jatos quentes pode ser descrito como um processo de descamação da rocha.

De acordo com esses estudos, fluxos de calor gerados pelo jato quente na superfície das rochas proporcionam altas tensões térmicas. Pela teoria estatística da falha por tensões, tais tensões internas seriam suficientes para desencadear o crescimento de micro-fissuras em regiões de não homogeneidade da rocha. Essas micro-fissuras se desenvolveriam até entrarem em uma condição instável de falha crítica por propagação de diversas fissuras, ocasionando assim a falha por ruptura da região superficial em pequenos flocos ou estilhaços (descamação ou *spall*). Este processo contínuo de descamação resulta no avanço da retirada de material da superfície da rocha acarretando assim a perfuração.

O Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LCP/INPE), em parceria com o Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

(DEM/PUC-Rio) vêm desenvolvendo trabalhos de simulação numéricas e experimentais (Rodrigues *et al*, 2006). Na Figura 2.8 mostra-se a bancada feita para o desenvolvimento dos testes correspondentes aos estudos do processo de descamação térmica em rochas duras. Os ensaios realizados nesta bancada demonstraram o bom funcionamento desta técnica na perfuração de rochas graníticas.

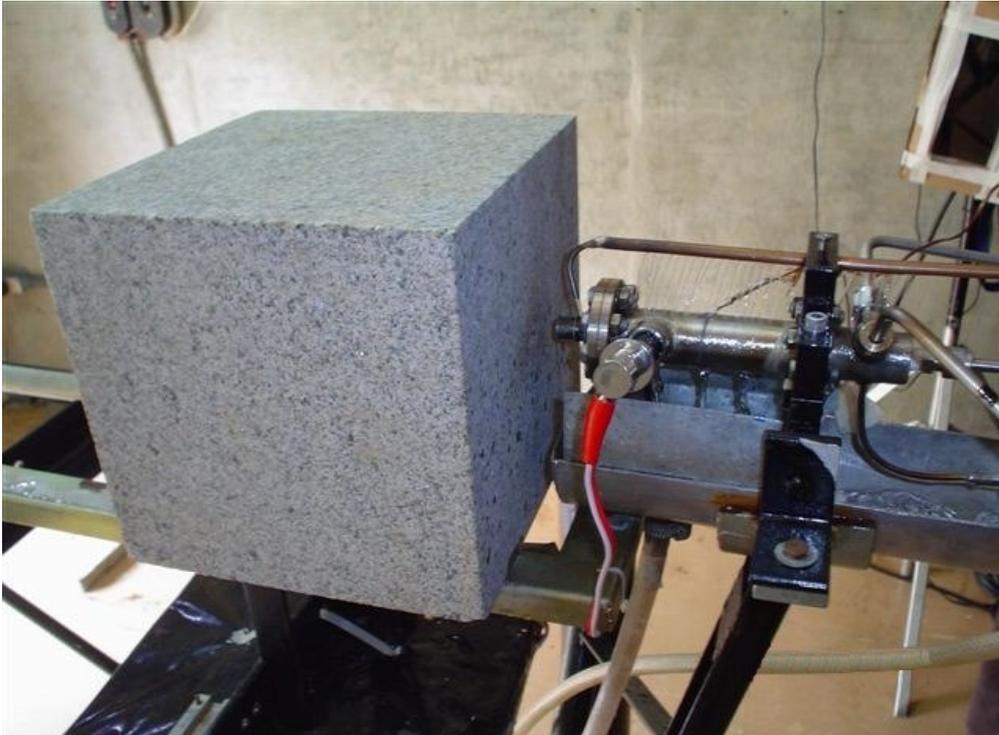


Figura 2.8: Bancada para o desenvolvimento dos ensaios (Rodrigues *et al*, 2006)

2.5.

Mecanismos de Descamação Térmica

As tensões térmicas causadas pela expansão do sólido com o aumento da temperatura causam a falha da rocha (Wilkinson, 1989). As escamas típicas têm de 0,1 a 2 milímetros de espessura, e seu diâmetro é cerca de 10 – 20 vezes a sua espessura (Dey e Kranz, 1985). Até o presente momento, os estudos realizados não permitiram identificar uma única propriedade da rocha que determine as dimensões do estilhaço. As rochas com módulo de Young e dureza mais elevadas são mais difíceis de perfurar quando utilizada uma técnica convencional, embora sejam mais frágeis. Browning (1965) determinou uma

correlação entre a tensão de compressão, a dureza, a perfuração convencional, e a descamação de rochas suscetíveis às trincas.

The Linde Air Division of Union Carbide formulou uma relação qualitativa entre a descamação e as propriedades da rocha, a qual descreve tendências que haviam sido consideradas ao se perfurar usando um diamante duro na rocha.

$$\text{Descamação} = \frac{C \alpha_r \beta_r (\text{Tamanho}_{\text{grão}})}{\sigma_c}, \quad (2.5)$$

onde C é uma constante, e β_r é o coeficiente linear de expansão térmica. Esta relação não se aplica necessariamente a todos os tipos de rocha (Calaman e Rolseth, 1961).

Diversos mecanismos foram propostos para descrever o processo de descamação térmica. O primeiro destes é citado por Wilkinson (1989), que estabeleceu uma relação entre este processo de corte e as isotermas paralelas à superfície da rocha. Este estudo foi realizado mediante a utilização de esferas de tijolos de argila aquecidas e resfriadas rapidamente. Embora não se tenha conseguido realizar a descamação mediante este teste, por que os cortes entre as camadas não era possível, devido ao confinamento que apresentam os tijolos de argila, pelo qual se concluiu que este tipo de corte não pode ser o mecanismo que cause a descamação. Além disso, observou-se que a falha no núcleo da amostra é devida às tensões exercidas pela camada externa aquecida em expansão.

Estudos citados por Rauenzahn (1986) estabelecem que Preston (1934) foi o primeiro a propor uma descrição qualitativa correta do estilhaçamento. Para este fim, foi realizado um confinamento da rocha. A seleção da amostra para o desenvolvimento do experimento foi baseada em dois critérios para se obter o processo de descamação:

- ❖ A área aquecida deve ser pequena quando comparada à dimensão característica da amostra, de modo que nenhum deslocamento na superfície seja possível,

- ❖ A taxa de aquecimento da superfície deve ser alta; de maneira que altos valores de temperatura da superfície sejam alcançados antes que uma fração apreciável do volume da amostra seja afetada pelo aquecimento. Esta elevada taxa de aquecimento impede o alívio de tensões no interior da rocha.

2.6.

Modos de Fratura

O mecanismo de fratura das rochas por tensões térmicas geradas pela incidência de um jato quente foi descrito por Rauenzahn (1986) e por Rauenzahn e Tester (1991), com base a estudos realizados por Dey (1984) e de Preston (1934), que também foram citados por Wilkinson (1989). Este mecanismo é ilustrado na Figura 2.9.

A superfície da rocha exposta ao jato quente tem a temperatura elevada por efeito de convecção e radiação do jato, enquanto que a energia térmica é transferida por condução de calor para o interior da rocha. Na direção normal a esta pequena porção de superfície exposta, altos gradientes de temperatura são induzidos, gerando assim grandes tensões térmicas em camadas paralelas à superfície. Falhas preexistentes no material se estendem sob a ação desta tensão de compressão, na direção de aplicação da tensão. Deste modo, as micro-fissuras desenvolvem-se paralelamente à superfície da rocha, já que a tensão de compressão também atua paralelamente à mesma. Não encontrando resistência na região superficial, esta camada comprimida pode sofrer flambagem (Wilkinson, 1989). Como consequência, ocorre a flambagem nas extremidades da camada, a qual se rompe sob efeito das tensões, criando assim o estilhaço (descamação ou *spall*). Desta forma, sob cada estilhaço gerado, é exposta a superfície ao jato quente e o mecanismo se repete sucessivamente, ocasionando desta maneira a perfuração por descamação.

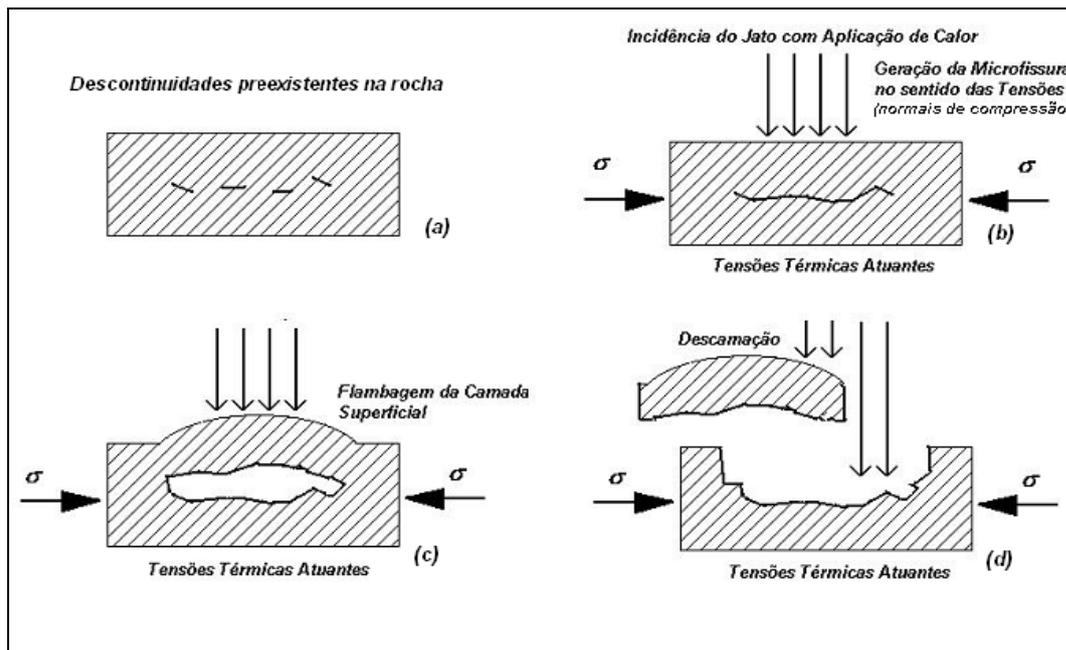


Figura 2.9: Processo de Descamação. (Wilkinson e Tester, 1993).

Dey e Kranz (1985), em colaboração com Rauenzahn e Tester (1991), estenderam a teoria de Weibull, para desenvolver uma descrição qualitativa da distribuição de temperatura e do fluxo de calor obtidas durante a descamação térmica. Estes autores basearam seu desenvolvimento em quatro suposições:

- ❖ As escamas são formadas por tensões de compressão através do mesmo mecanismo que causa a quebra uniaxial em amostras comprimidas por técnicas convencionais.
- ❖ O calor difunde-se na rocha somente em uma pequena profundidade, de tal modo que o estado das tensões térmicas não é influenciado pela forma do furo.
- ❖ A teoria clássica da viga e da placa pode ser usada para descrever as circunstâncias em que a escama é separada da rocha.
- ❖ As distribuições estatísticas propostas por Weibull, citadas por Dey e Kranz (1985), descrevem a variação heterogênea da força da rocha em pequenas escalas (~ 1 mm de espessura), típicas das escamas.

2.7.

Aerodinâmica

O processo de descamação térmica de uma rocha pela ação de um jato supersônico quente, oriundo de um queimador, envolve diversos fenômenos físicos acoplados. Na Figura 2.10 mostra-se o desenvolvimento do escoamento do jato compressível subsônico e supersônico no estado estacionário e turbulento oriundo da câmara de combustão. Na Figura 2.11 ilustra-se a transferência de calor do jato supersônico por convecção e por radiação à superfície da rocha, e na Figura 2.12 mostra-se o processo de descamação mediante a interação do jato supersônico e a rocha exposta.

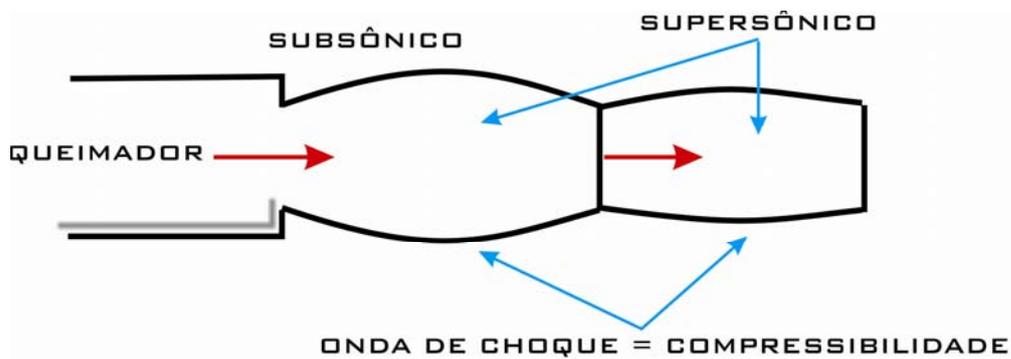


Figura 2.10: Escoamento compressível supersônico e subsônico não estacionário e turbulento.

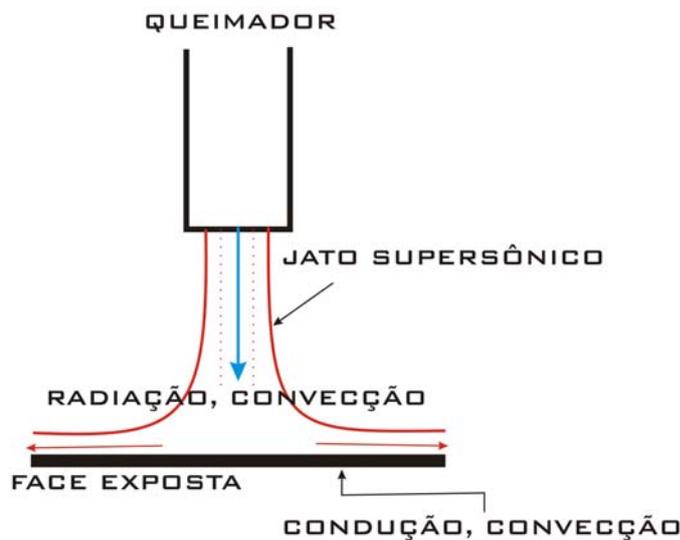


Figura 2.11: Transferência de calor entre os gases quentes e a superfície da rocha por convecção e por radiação.

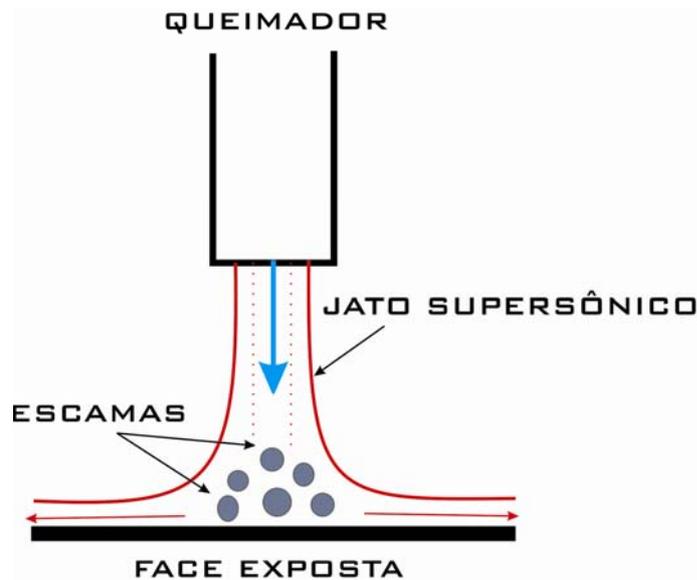


Figura 2.12: Interação entre as escamas sólidas oriundas da rocha e o escoamento.

A modelagem completa destes fenômenos é um problema aberto. São discutidas abaixo as principais dificuldades potenciais.

Jatos supersônicos quentes e densos são objetos de estudo recentes (Panda, 1998). Estes estudos mostram que, mesmo na ausência de parede sólida, observam-se oscilações transversais de grande amplitude envolvendo importantes flutuações de pressão, as quais são relacionadas às ondas de choque presentes no escoamento. Este tipo de flutuação é responsável por um acréscimo na intensidade da mistura entre o jato e seu redor. A presença de uma parede sólida altera sensivelmente o escoamento. Além de introduzir uma mudança brusca na direção do escoamento supersônico, com conseqüente desaceleração; o anteparo sólido pode ter por efeito a amplificação de instabilidades acústicas longitudinais, como foi mostrado nos estudos de Glaznev (1991), Sokolov (1992), Gorshkov et al. (1993) e Ghorshkov e Uskov (1999).

Estes trabalhos mostram que a sobrepressão induzida por essa amplificação possui frequências próprias da ordem de vários kilohertz e amplitudes de dezenas de decibéis, sendo que tanto a amplitude quanto a frequência são funções da distância que separa a saída do jato do anteparo, da razão de pressões entre o jato e o ambiente e do número de Mach do jato.

No tocante à modelagem da turbulência, a influência da compressibilidade sobre as flutuações turbulentas ocorre tanto no jato quanto na camada limite que se desenvolve sobre a superfície da rocha. Contrariamente aos escoamentos de baixa velocidade, as flutuações de pressão no escoamento supersônico exercem uma influência importante nas características da turbulência (Sarkar et al. 1991). Em particular, a correlação entre pressão, a dilatação e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta são funções crescentes do número de Mach turbulento.

O comportamento da camada limite que se desenvolve sobre a superfície da rocha também é modificado pela compressibilidade do escoamento, sendo necessário levar em conta tais modificações na modelagem utilizada (Zhang et al 1991, Zeman, 1993). Uma vez que o transporte turbulento no interior da camada limite é influenciado pela compressibilidade aerodinâmica, a transferência de calor por convecção do gás para a parede será igualmente modificada.

A combustão de hidrocarbonetos (gás natural, propano, querosene, etc.) com oxigênio ou com ar resulta, freqüentemente, em produtos de combustão contendo uma fração importante de partículas sólidas microscópicas. Estas partículas sólidas, que se encontram a temperaturas próximas a dos gases quentes, podem resultar em um fluxo de calor por radiação, entre o gás e o sólido, o qual pode ser da mesma ordem de grandeza que o fluxo de calor por convecção. Ambas as contribuições devem ser levadas em conta para a correta predição do fluxo de calor do gás para a rocha, e logo da taxa de penetração nesta.

Os trabalhos de modelagem mais recentes encontrados na literatura (Wilkinson 1989, Wilkinson e Tester 1993b) limitam-se a considerar a influência dos transportes turbulentos sobre o fluxo de calor, sem levar em conta a influência da compressibilidade, da transferência de calor por radiação ou o escoamento bifásico constituído por gás e escamas. As incertezas envolvidas nos diferentes modelos existentes para os processos descritos acima necessitam ser examinadas em detalhe antes de sua utilização..